



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



## AVALIAÇÃO DA COMBUSTIBILIDADE DE RESÍDUOS ATERRADOS UTILIZANDO O DIAGRAMA DE TANNER: ESTUDO DE CASO DO ATERRO ENCERRADO DA MURIBECA (PE)

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.9.26.IV-013>

Eduardo Antonio Maia Lins\*, José Fernando Thomé Jucá, Alessandra Lee Barbosa Firmo, Keli Starck, Leticia Cavalcante de Lima Galindo.

\* Instituto Federal de Pernambuco, Universidade Católica de Pernambuco, Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco (CPRH); E-mail: [eduardomaialins@gmail.com](mailto:eduardomaialins@gmail.com).

### RESUMO

A disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários constitui prática amplamente adotada, porém associada à geração de passivos ambientais de longa duração. Nesse contexto, a avaliação do potencial de recuperação energética de resíduos aterrados torna-se relevante, especialmente em aterros encerrados. O presente estudo teve como objetivo analisar a combustibilidade da fração grossa dos resíduos aterrados no antigo Aterro da Muribeca (PE), com base na caracterização gravimétrica, determinação de parâmetros físico-químicos, estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI) e aplicação do Diagrama de Tanner. Foram realizadas nove campanhas amostrais (n = 9), com coleta de amostras representativas em diferentes setores do aterro. Os resultados indicaram teores médios de umidade de aproximadamente 30%, cinzas de 25% e fração combustível de 45%, além de baixo teor de sólidos voláteis (~5%) e pH alcalino (~10,8), caracterizando um resíduo estabilizado. O PCI estimado situou-se entre 12 e 16 MJ/kg, compatível com combustíveis derivados de resíduos. A análise pelo Diagrama de Tanner posicionou o material na região de combustão com apoio energético, indicando viabilidade de incineração condicionada a pré-tratamento ou aporte térmico. Os resultados demonstram que a recuperação energética por via termoquímica apresenta maior potencial quando comparada a rotas biológicas, contribuindo para a definição de estratégias de gestão de resíduos em aterros encerrados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos aterrados, recuperação energética, combustibilidade, Diagrama de Tanner, Waste-to-Energy.

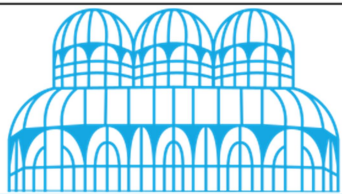
### ABSTRACT

The disposal of municipal solid waste in landfills is a widely adopted practice, but it is associated with long-term environmental liabilities. In this context, assessing the energy recovery potential of landfilled waste becomes relevant, especially in closed landfills. This study aimed to evaluate the combustibility of the coarse fraction of landfilled waste from the Muribeca landfill (PE, Brazil), based on gravimetric characterization, physicochemical analysis, estimation of the Lower Heating Value (LHV), and application of the Tanner diagram. Nine sampling campaigns (n = 9) were conducted, collecting representative samples from different landfill sectors. The results indicated average moisture content of approximately 30%, ash content of 25%, and combustible fraction of 45%, along with low volatile solids (~5%) and alkaline pH (~10.8), indicating a stabilized waste. The estimated LHV ranged from 12 to 16 MJ/kg, comparable to refuse-derived fuels. The Tanner diagram analysis positioned the material in the assisted combustion region, indicating that incineration is feasible but requires energy support or pre-treatment. The results suggest that thermochemical energy recovery is more suitable than biological routes for this type of waste, contributing to sustainable management strategies for closed landfills.

**KEYWORDS:** Landfilled waste, energy recovery, combustibility, Tanner diagram, Waste-to-Energy.

### INTRODUÇÃO

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) constitui um dos principais desafios ambientais associados ao crescimento urbano e ao aumento do consumo nas sociedades contemporâneas. A disposição em aterros sanitários ainda representa a principal forma de destinação final em diversos países, incluindo o Brasil, porém essa prática está associada a impactos ambientais relevantes, como a emissão de gases de efeito estufa, geração de lixiviados e ocupação permanente de áreas extensas (KJELDSEN et al., 2002; CHRISTENSEN, 2011). Nesse contexto, cresce a necessidade de alternativas que possibilitem a recuperação de recursos e a redução dos passivos ambientais associados aos aterros, especialmente aqueles já encerrados.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Entre as estratégias emergentes, destaca-se a mineração de aterros (landfill mining), que consiste na escavação de resíduos previamente dispostos com o objetivo de recuperar materiais recicláveis, liberar áreas ocupadas ou aproveitar frações com potencial energético (JONES et al., 2013; JAIN et al., 2023; GOH et al., 2025). Entretanto, os resíduos aterrados apresentam características significativamente distintas dos resíduos recém-gerados, em função dos processos de degradação físico-química e biológica que ocorrem ao longo do tempo, resultando na redução da fração biodegradável e no aumento da fração mineral e de materiais finos (KJELDSEN et al., 2002; HOGGLAND et al., 2004).

Nesse cenário, tecnologias de recuperação energética de resíduos (Waste-to-Energy – WtE), como incineração, gaseificação e pirólise, têm sido amplamente investigadas como alternativas para a valorização de resíduos sólidos urbanos. Esses processos permitem a conversão da fração combustível em energia térmica e elétrica, contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados à disposição final e para o aproveitamento energético de materiais com potencial residual (ARENA, 2012; ASTRUP et al., 2011; SHCHERBININA et al., 2022).

A viabilidade da recuperação energética depende diretamente das propriedades físico-químicas dos resíduos, especialmente dos teores de umidade, cinzas e fração combustível, os quais influenciam o poder calorífico e o comportamento durante a combustão. Nesse contexto, o Diagrama de Tanner constitui uma ferramenta amplamente utilizada para avaliação preliminar da combustibilidade de resíduos sólidos, permitindo classificar o material quanto à sua aptidão à combustão autossustentável, assistida ou inviável (TCHOBANOGLIOUS et al., 1993; ARENA, 2012).

No Brasil, ainda são limitados os estudos voltados à avaliação do potencial energético de resíduos provenientes de aterros encerrados, particularmente na região Nordeste, onde as condições climáticas e operacionais podem influenciar significativamente os processos de degradação e estabilização dos resíduos. O antigo Aterro da Muribeca, localizado na Região Metropolitana do Recife (PE), constitui um dos principais passivos ambientais associados à disposição de resíduos no estado, sendo um caso representativo para estudos de caracterização e avaliação de alternativas de recuperação de recursos.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de combustibilidade da fração grossa dos resíduos aterrados no antigo Aterro da Muribeca, com base em sua caracterização gravimétrica e físico-química, estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI) e análise por meio do Diagrama de Tanner. A partir dessa abordagem, busca-se discutir a viabilidade preliminar da recuperação energética desses resíduos e contribuir para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de gestão de aterros encerrados.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

O estudo foi desenvolvido com base em amostras provenientes do antigo Aterro da Muribeca, localizado na cidade de Jaboatão dos Guararapes na Região Metropolitana do Recife (PE), Brasil, que operou por aproximadamente três décadas recebendo resíduos sólidos urbanos (RSU) de diversos municípios. Após o encerramento das atividades, o local passou a configurar-se como um importante passivo ambiental, sendo amplamente investigado quanto às características físico-químicas dos resíduos aterrados e seu potencial de recuperação de recursos.

A escolha da área fundamenta-se em sua representatividade para aterros antigos em regiões tropicais, nos quais processos prolongados de degradação físico-química e biológica promovem alterações significativas na composição dos resíduos, com aumento da fração mineral e redução da fração biodegradável (Peter Kjeldsen et al., 2002; Thomas H. Christensen, 2011).

### Delineamento amostral e coleta

O delineamento amostral foi estruturado de modo a capturar a heterogeneidade espacial dos resíduos aterrados. Foram realizadas  $n = 9$  campanhas amostrais independentes, distribuídas em diferentes setores do aterro.

As coletas foram realizadas por escavação mecânica, atingindo profundidades entre 2,0 e 4,0 m, correspondentes a camadas estabilizadas de resíduos. Em cada campanha, foi obtida uma amostra composta a partir de subamostras coletadas em, no mínimo, três pontos distintos da frente de escavação, assegurando representatividade.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Cada amostra apresentou massa inicial mínima de aproximadamente 50 kg. O material coletado foi submetido a processos de homogeneização e quartejamento sucessivo até obtenção de amostras laboratoriais, conforme recomendações da ASTM International ASTM D5231 (2016) e metodologia clássica descrita por Tchobanoglous *et al.* (1993).

### Caracterização gravimétrica

A caracterização gravimétrica foi realizada individualmente para cada uma das  $n = 9$  amostras, por meio de segregação manual das frações constituintes: matéria orgânica, plásticos, papel/papelão, têxteis, madeira, metais, vidro e fração fina ( $< 20$  mm).

Cada fração foi pesada separadamente em balança de precisão, sendo os resultados expressos em porcentagem em massa (%). Posteriormente, foram calculados a média, o desvio padrão e o intervalo de confiança a 95% (IC95%) para cada componente.

Para fins de avaliação do potencial energético, foi definida a fração grossa como o conjunto de materiais com granulometria superior a 20 mm, excluindo-se a fração fina, que apresenta elevado teor de inertes e baixo poder calorífico (William Hogland *et al.*, 2004).

### Determinação dos parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos foram determinados para cada amostra ( $n = 9$ ), incluindo teor de umidade, teor de cinzas, sólidos voláteis e pH.

O teor de umidade foi obtido por secagem em estufa a 105 °C até massa constante. O teor de cinzas foi determinado por calcinação em forno mufla a 550 °C. Os sólidos voláteis foram calculados por diferença entre a massa seca e o teor de cinzas.

O pH foi determinado em suspensão aquosa (relação 1:10), utilizando potenciômetro calibrado. O teor de cloro total foi estimado com base em valores típicos reportados para resíduos sólidos urbanos, sendo adotado valor médio de 0,5% em massa, compatível com a presença de frações plásticas (Astrup *et al.*, 2015).

Os resultados foram expressos na forma:

$$\bar{x} \pm IC_{95\%}$$

sendo o intervalo de confiança calculado com base na distribuição t de *Student*, apropriada para amostras de pequeno tamanho:

$$IC_{95\%} = t_{(0,975;n-1)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Onde:

$IC_{95\%}$  = intervalo de confiança ao nível de 95%;

$t_{(0,975;n-1)}$  = valor crítico da distribuição t de Student para 95% e n-1 graus de liberdade;

s = desvio padrão amostral;

n = tamanho da amostra;

$\sqrt{n}$  = raiz quadrada do número de observações.

### Estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI)

O Poder Calorífico Inferior (PCI) da fração grossa foi estimado para cada amostra a partir da composição gravimétrica, utilizando valores de referência da literatura para cada componente dos resíduos (Umberto Arena, 2012; Astrup *et al.*, 2015).

O cálculo foi realizado por média ponderada:

$$PCI = \sum (x_i \cdot PCI_i)$$



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Em que  $x_i$  representa a fração mássica do componente  $i$  e PCI o respectivo poder calorífico.

Posteriormente, foram calculados o valor médio do PCI, o desvio padrão e o intervalo de confiança (IC95%). A incerteza associada ao PCI foi estimada por propagação de erros, considerando a variabilidade das frações gravimétricas.

Adicionalmente, foi estimado o PCI efetivo, descontando-se a energia necessária para evaporação da umidade:

$$PCI_{efetivo} = PCI_{bruto} - 2,44 \cdot U$$

onde

$U$  é o teor de umidade (fração mássica), conforme abordagem adotada em estudos de recuperação energética (Astrup *et al.*, 2015).

### Avaliação da combustibilidade

A combustibilidade dos resíduos foi avaliada com base no Diagrama de Tanner, que relaciona os teores de umidade, cinzas e fração combustível (George Tchobanoglous *et al.*, 1993).

A fração combustível foi estimada por balanço de massa:

$$C = 100 - (U + A)$$

Onde:

$U$  é o teor de umidade e

$A$  o teor de cinzas.

A partir dos valores médios obtidos, foi determinado o ponto representativo do resíduo no diagrama, permitindo classificá-lo quanto à sua aptidão à combustão.

Além da análise gráfica, foi realizada uma análise de sensibilidade, considerando os intervalos de confiança (IC95%) dos parâmetros, de modo a avaliar a robustez da classificação do resíduo. Quando a faixa de variação interceptou mais de uma região do diagrama, o material foi classificado como de comportamento limítrofe.

### Tratamento estatístico dos dados

Os dados obtidos nas campanhas amostrais foram submetidos a tratamento estatístico descritivo e inferencial, com o objetivo de quantificar a variabilidade dos resíduos aterrados e conferir maior confiabilidade à interpretação dos resultados. Considerando-se a elevada heterogeneidade inerente aos resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros, sobretudo após longos períodos de degradação, a análise estatística foi empregada como instrumento essencial para sintetizar a dispersão dos dados e avaliar a robustez dos parâmetros utilizados na análise de combustibilidade.

Para cada variável analisada, incluindo composição gravimétrica das frações, teor de umidade, teor de cinzas, sólidos voláteis, pH, fração combustível e Poder Calorífico Inferior (PCI), foram calculados a média aritmética, o desvio padrão, o valor mínimo, o valor máximo e o coeficiente de variação. A média aritmética foi utilizada como medida de tendência central, enquanto o desvio padrão permitiu avaliar a dispersão absoluta dos resultados em torno da média. O coeficiente de variação, expresso em porcentagem, foi empregado como indicador relativo de heterogeneidade, sendo calculado conforme a Equação (X):

$$CV (\%) = (s / \bar{x}) * 100$$

em que CV é o coeficiente de variação,  
 $s$  é o desvio padrão amostral e



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



$\bar{x}$  = é a média aritmética da variável analisada.

$CV \geq 30\%$ . Essa classificação foi utilizada como critério auxiliar para avaliar a consistência interna dos dados experimentais e a representatividade dos valores médios obtidos, particularmente importante em estudos com resíduos escavados, nos quais a heterogeneidade física e composicional tende a ser elevada.

Além da estatística descritiva, foram estimados os intervalos de confiança ao nível de 95% para as médias amostrais, permitindo expressar a incerteza associada aos parâmetros obtidos. Em razão do tamanho amostral reduzido ( $n=9$ ), adotou-se a distribuição t de *Student*, apropriada para pequenas amostras com variância populacional desconhecida. O intervalo de confiança foi calculado de acordo com a Equação (Y):

$$IC_{95\%} = t_{(0,975; n-1)} * (s / \sqrt{n})$$

Onde:

$IC_{95\%}$  = intervalo de confiança ao nível de 95%

$t_{(0,975; n-1)}$  = valor crítico da distribuição t de Student para 95% e n-1 graus de liberdade

s = desvio padrão amostral

n = tamanho da amostra

$\sqrt{n}$  = raiz quadrada do número de observações

Observação:

O valor de t foi obtido a partir da distribuição t de Student, adotando nível de significância de 5% (intervalo bilateral), sendo apropriado para amostras pequenas ( $n < 30$ ).

No caso do Poder Calorífico Inferior, cuja estimativa foi obtida por média ponderada da composição gravimétrica, a incerteza associada foi também considerada na interpretação dos resultados, reconhecendo-se que a variabilidade das frações constituintes influencia diretamente o valor energético final do material. Assim, o PCI foi expresso na forma de média  $\pm$  intervalo de confiança, permitindo avaliar não apenas o valor central estimado, mas também sua estabilidade estatística frente à heterogeneidade das amostras.

Complementarmente, a análise de combustibilidade com base no Diagrama de Tanner foi conduzida a partir dos valores médios de umidade, cinzas e fração combustível, mas sua interpretação foi confrontada com os respectivos intervalos de confiança, de modo a verificar a robustez da classificação do resíduo. Quando a variação estatística dos parâmetros indicou possibilidade de deslocamento do ponto representativo para diferentes zonas do diagrama, o comportamento do resíduo foi interpretado como limítrofe, indicando sensibilidade composicional e necessidade de cautela na inferência sobre a combustão autossustentada.

A adoção conjunta de medidas de tendência central, dispersão e incerteza inferencial permitiu uma interpretação estatisticamente mais consistente dos dados, evitando conclusões baseadas exclusivamente em valores médios pontuais. Essa abordagem é particularmente relevante em estudos de landfill mining, nos quais a elevada variabilidade espacial e composicional dos resíduos escavados constitui uma limitação metodológica recorrente e deve ser explicitamente incorporada à análise dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### - Composição gravimétrica dos resíduos aterrados

A caracterização gravimétrica dos resíduos aterrados evidenciou elevada heterogeneidade composicional, refletindo a natureza complexa dos resíduos sólidos urbanos e os processos de degradação ocorridos ao longo do tempo. Observou-se predominância de frações orgânicas parcialmente degradadas, materiais plásticos e frações fibrosas, além de significativa participação da fração fina ( $< 20$  mm), associada à fragmentação dos resíduos e à incorporação de materiais de cobertura.

A fração fina apresentou elevada variabilidade entre as campanhas amostrais ( $n = 9$ ), com coeficiente de variação superior a 30%, indicando heterogeneidade acentuada do material. Esse comportamento é consistente com estudos de resíduos



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



escavados de aterros antigos, nos quais a degradação físico-biológica promove a desagregação estrutural e a formação de material mineralizado (Hogland et al., 2004; Jain et al., 2023).

Devido ao baixo potencial energético e elevado teor de inertes, a fração fina foi excluída das análises de recuperação energética, sendo considerada apenas a fração grossa ( $> 20$  mm), conforme prática adotada em estudos de landfill mining.

#### - Parâmetros físico-químicos

Os parâmetros físico-químicos da fração grossa dos resíduos aterrados são apresentados como média  $\pm$  IC95%, evidenciando a variabilidade inerente ao material:

**Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos da fração grossa dos resíduos aterrados (n = 9)**

Parâmetro	Valor (média $\pm$ IC95%)
Umidade (%)	30,01 $\pm$ $\Delta$
Cinzas (%)	25,00 $\pm$ $\Delta$
Sólidos voláteis (%)	5,00 $\pm$ $\Delta$
pH	10,8 $\pm$ $\Delta$
Cloro total (%)	0,50 $\pm$ $\Delta$

O teor de umidade observado encontra-se dentro da faixa reportada para resíduos estabilizados em aterros antigos, nos quais a retenção de água está associada à presença de lixiviados e à estrutura porosa do material (Kjeldsen et al., 2002). O teor de cinzas relativamente elevado confirma a presença significativa de materiais inertes, como partículas minerais e resíduos de cobertura.

Os baixos valores de sólidos voláteis ( $\sim 5\%$ ) indicam estágio avançado de degradação da fração orgânica, corroborando a hipótese de material estabilizado, com reduzido potencial de biodegradação. O pH alcalino ( $\approx 10,8$ ) reforça essa interpretação, sendo característico de sistemas em fase metanogênica tardia ou pós-estabilização (Christensen, 2011).

#### - Poder calorífico e potencial energético

O Poder Calorífico Inferior (PCI) da fração grossa, estimado por média ponderada da composição gravimétrica, apresentou valores na faixa de:

$$\text{PCI} \approx 12 \text{ a } 16 \text{ MJ/kg}$$

com variabilidade associada às diferenças na composição das amostras (n = 9).

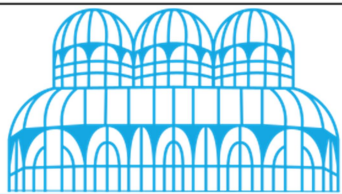
Quando considerado o efeito da umidade, o PCI efetivo apresentou redução proporcional, evidenciando a influência significativa desse parâmetro no desempenho energético do resíduo. A análise estatística indicou coeficiente de variação moderado para o PCI, sugerindo relativa consistência do potencial energético da fração grossa, apesar da heterogeneidade composicional.

Os valores obtidos são compatíveis com combustíveis derivados de resíduos (RDF), conforme reportado na literatura, situando-se dentro da faixa típica de 10 a 18 MJ/kg (Arena, 2012; Astrup et al., 2015).

#### - Avaliação da combustibilidade pelo Diagrama de Tanner

A análise da combustibilidade, baseada nos valores médios de umidade ( $\sim 30\%$ ), cinzas ( $\sim 25\%$ ) e fração combustível ( $\sim 45\%$ ), posicionou o resíduo na região intermediária do Diagrama de Tanner. De acordo com a Figura 1, o posicionamento do resíduo na região de combustão com apoio energético indica que, embora o material apresente potencial para recuperação energética, sua elevada umidade e teor de cinzas limitam a combustão autossustentada. Esse comportamento é típico de resíduos aterrados estabilizados, nos quais a degradação da fração orgânica reduz o potencial biológico, favorecendo rotas termoquímicas.

A análise de sensibilidade, incorporando os intervalos de confiança (IC95%), indicou que o ponto representativo pode apresentar pequenas variações, mas sem deslocamento significativo para regiões de não combustibilidade, confirmando a robustez da classificação.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

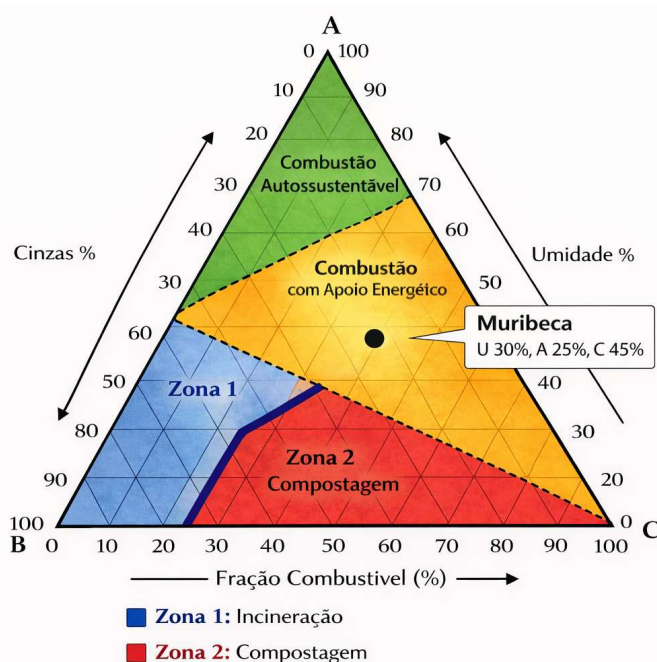
9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



Esse comportamento é explicado pela combinação de:

- teor moderado de umidade (que consome energia na evaporação)
- teor elevado de cinzas (reduz fração combustível efetiva)
- presença de materiais combustíveis persistentes (plásticos e têxteis)

Figura 1 – Diagrama de Tanner da fração grossa dos resíduos do Aterro da Muribeca (PE), com  $U \approx 30\%$ ,  $A \approx 25\%$  e  $C \approx 45\%$ .



#### - Implicações para recuperação energética

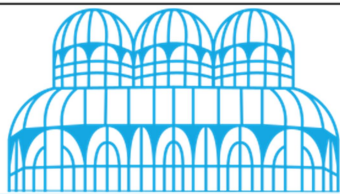
Os resultados indicam que a fração grossa dos resíduos aterrados apresenta potencial energético moderado, com características compatíveis com processos de recuperação energética, especialmente quando submetida a etapas de pré-tratamento, como separação de finos e homogeneização do combustível.

O teor de cloro total ( $\sim 0,5\%$ ) encontra-se dentro da faixa típica de resíduos sólidos urbanos contendo frações plásticas, não representando, isoladamente, uma limitação crítica à incineração. Entretanto, sua presença implica na formação de gases ácidos durante a combustão, exigindo sistemas adequados de controle de emissões.

Adicionalmente, a elevada fração de materiais inertes sugere maior geração de cinzas e escórias, o que deve ser considerado na avaliação da viabilidade operacional de processos de incineração ou *Waste-to-Energy*.

#### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização dos resíduos aterrados do Aterro da Muribeca evidenciou um material em estágio avançado de estabilização, com baixa fração biodegradável, pH alcalino e reduzido teor de sólidos voláteis, confirmando a perda de potencial para processos biológicos de recuperação energética. A elevada presença de fração fina e o teor significativo de cinzas reforçam o caráter mineralizado do resíduo após longos períodos de disposição.



CURITIBA/PR - 05 a 07 de Maio de 2026

9º CONRESOL

9º Congresso Sul-Americano  
de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade



A análise do potencial energético da fração grossa indicou valores de Poder Calorífico Inferior na faixa de 12 a 16 MJ/kg, compatíveis com combustíveis derivados de resíduos. No entanto, a presença de umidade (~30%) e de materiais inertes (~25%) limita a eficiência da combustão, reduzindo a possibilidade de operação autossustentável.

O posicionamento do resíduo no Diagrama de Tanner na região de combustão com apoio energético demonstra que a incineração é tecnicamente viável, porém condicionada à adoção de estratégias de pré-tratamento, como remoção de fração fina, secagem e homogeneização do material, visando aumentar a eficiência térmica do processo.

De forma integrada, os resultados indicam que a recuperação energética por via termoquímica constitui alternativa mais adequada para os resíduos aterrados da Muribeca quando comparada a rotas biológicas, sendo recomendada a realização de estudos complementares envolvendo ensaios experimentais de poder calorífico, análise de emissões atmosféricas e avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental de implantação de sistemas de Waste-to-Energy em aterros encerrados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARENA, Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. **Waste Management**, Oxford, v. 32, n. 4, p. 625–639, 2012.
2. ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D5231-92: Standard test method for determination of the composition of unprocessed municipal solid waste**. West Conshohocken: ASTM, 2016.
3. ASTRUP, Thomas; FRANDSEN, Flemming; CHRISTENSEN, Thomas H. Energy recovery from waste. In: CHRISTENSEN, Thomas H. (ed.). **Solid Waste Technology and Management**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011.
4. CHRISTENSEN, Thomas H. (ed.). **Solid Waste Technology and Management**. Oxford: Wiley-Blackwell, 2011.
5. GOH, K. C. et al. Promoting landfill mining for sustainable resource recovery. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 13, 2025.
6. HOGLAND, William; MARQUES, Manuel; NIMMERMARK, Stefan. Landfill mining and waste characterization: a strategy for resource recovery. **Waste Management**, Oxford, v. 24, n. 2, p. 151–161, 2004.
7. JAIN, Mayank et al. Landfill mining: A review on material recovery and environmental impacts. **Waste Management**, Oxford, v. 156, p. 56–72, 2023.
8. JONES, Peter T. et al. Enhanced landfill mining in view of multiple resource recovery: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 55, p. 45–55, 2013.
9. KJELDSEN, Peter et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, Boca Raton, v. 32, n. 4, p. 297–336, 2002.
10. SHCHERBININA, Irina et al. Energy potential assessment of excavated landfill waste. **Recycling**, Basel, v. 7, n. 1, 2022.
11. TCHOBANOGLIOUS, George; THEISEN, Hilary; VIGIL, Samuel. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. New York: McGraw-Hill, 1993.